

Maciej BARTOLD

Uniwersytet Warszawski

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

e-mail: maksb1983@gmail.com

**WYZNACZANIE POCZĄTKU I KOŃCA OKRESU WEGETACYJNEGO
LASÓW LIŚCIASTYCH W POLSCE NA PODSTAWIE
WIELOLETNIICH OBSERWACJI SATELITARNYCH SPOT
VEGETATION I PROBA-V**

**Determining the onset and the end of the growing season of the
broad-leaved forests over Poland using long-term SPOT Vegetation
and Proba-V satellite observations**

Zarys treści: W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań zmienności czasowej fenologii lasów liściastych w Polsce na podstawie obserwacji satelitarnych. W tym celu wykorzystano szeregi czasowe wskaźnika wegetacji Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), obliczonego na podstawie rejestracji z satelitów SPOT-Vegetation i Proba-V w latach 1999-2014. Za pomocą oprogramowania TIMESAT wyznaczono parametry charakteryzujące wegetację lasów, tj. start i koniec okresu wegetacyjnego, maksimum wskaźnika wegetacji NDVI w okresie wegetacyjnym. Wyniki badań pokazują duże możliwości wykorzystania danych satelitarnych do badania fenologii lasów liściastych w Polsce. Monitorowanie zmian czasu trwania okresu wegetacyjnego oraz zbadanie wpływu warunków meteorologicznych na zaobserwowane zmiany pozwalają na lepsze zrozumienie fenologii roślin w aspekcie zachodzących zmian klimatycznych.

Abstract: The paper presents the results on the investigating phenological changes using satellite-based vegetation indices in broad-leaved forests over Poland. This study used Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time-series derived from SPOT Vegetation and Proba-V images from 1999 to 2014. The onset of the growing season, end of the season, maximum NDVI observed during the growing season were determined using TIMESAT program. Results of the study shows that satellite data can be used in a variety of ways in research of phenology of broad-leaved forests in Poland. More studies on forest phenology metrics and its relations to meteorological observations in Poland will help to understand the responses of temperate forest phenology to climate changes.

Słowa kluczowe: okres wegetacyjny, NDVI, monitoring lasów, test Manna-Kendalla, zdjęcia satelitarne
Key words: growing season, NDVI, forest monitoring, Mann-Kendall test, satellite images

WSTĘP

Istniejące obecnie systemy monitorowania lasów w Polsce są stale rozwijane i udoskonalane zgodnie z rosnącymi potrzebami polityki leśnej państwa. Opierają się one na informacjach z pomiarów naziemnych oraz danych pozyskiwanych zdalnie. Bank Danych o Lasach i Wielkoobszarowa

Wpłynęło: 18.04.2018

Zaakceptowano: 15.09.2018

Zalecany sposób cytowania: Bartold M., 2018, Wyznaczanie początku i końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych SPOT Vegetation i Proba-V, *Prace i Studia Geograficzne*, 63.3, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 7-31.

Inwentaryzacja Stanu Lasu są systemami planistyczno-prognostycznymi, w których informacje są gromadzone na podstawie ciągłych lub okresowych obserwacji terenowych. Z kolei w projektach badawczych LIFE+ ForBioSensing oraz BIOSTRATEG RemBioFor są wykorzystywane dane teledetekcyjne oraz nowoczesne narzędzia ich przetwarzania, odpowiednio dla potrzeb monitorowania dynamiki drzewostanów oraz przestrzennego rozkładu biomasy drzew i zawartego w niej węgla.

W kontekście adaptacji lasów do zmian klimatu konieczne jest wprowadzenie do programu monitorowania lasów nowych wskaźników, które pozwolą na identyfikację czynników warunkujących zmiany w regionach (Hufnagel, Garamvölgyi 2014; State of Europe's Forests 2015). Naukowcy podkreślają wpływ klimatu na zmiany zasięgu gatunków drzew, wydłużanie lub skrócenie okresu wegetacji, a tym samym na przesunięcia faz fenologicznych. Również w Narodowym Programie Leśnym, powstałym z inicjatywy Ministerstwa Środowiska i Instytutu Badawczego Leśnictwa, zwrócono uwagę na potrzebę uzupełnienia istniejących systemów monitorowania lasów o nowe obserwacje, w tym fenologię roślin i owadów (Wawrzoniak 2014).

Fenologia zajmuje się badaniem zjawisk przyrody, które zachodzą w świecie roślin i zwierząt w zależności od warunków środowiska (Molga 1970). Przykładem obserwacji fenologicznych u wybranych gatunków drzew są badania własne Kluzy, Zientarskiej (1999) oraz obserwacje prowadzone z wykorzystaniem automatycznej stacji meteorologicznej, wyposażonej w aparat fotograficzny lub kamerę zdalnie rejestrującą procesy rozwojowe roślin (Mager, Kępińska-Kasprzak 2015). Z kolei Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej nadzoruje sieć pięćdziesięciu jeden stacji synoptycznych, na których od 2007 roku są prowadzone obserwacje fitofenologiczne dla dziesięciu gatunków roślin dziko rosnących (Mager, Kępińska-Kasprzak 2016). Wyniki obserwacji są udostępniane na stronie internetowej, poświęconej informacji i prognozom agrometeorologicznym, pod adresem <http://agrometeo.pogodynka.pl>.

Teledetekcja satelitarna może stanowić wsparcie w monitorowaniu przebiegu faz fenologicznych roślin. Urządzenia teledetekcyjne rejestrują wartości odbicia, które są zróżnicowane dla gatunków roślin i zmieniają się w czasie, w zależności od stanu ich rozwoju (Ciołkosz i in. 1999). Na jasność spektralną poszczególnych gatunków wpływa faza fenologiczna, a idące za nimi zmiany współczynników jasności wywołane fazami rozwoju roślin najwyraźniej zaznaczają się u drzew liściastych (Backström, Welander 1953). Istnieje szereg teledetekcyjnych wskaźników roślinnych, w których wykorzystuje się właściwości spektralne chlorofilu zawartego w roślinach oraz struktur komórkowych i tkankowych. Wskaźniki roślinne wyprowadzane na podstawie wieloletnich zobrażeń satelitarnych pozwalają na śledzenie czasowo-przestrzennej zmienności dynamiki wzrostu i rozwoju roślin.

Technologie teledetekcyjne pozwalają na matematyczne modelowanie obserwowanych przebiegów wskaźników, na podstawie których wyznaczane są parametry charakteryzujące okres wegetacyjny, jego początek i koniec. W tym celu najczęściej są wykorzystywane szeregi czasowe wskaźnika wegetacji *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), który jest jednym z najbardziej uniwersalnych mierników kondycji i wigoru roślinności. Na przykład szeregi czasowe wskaźnika NDVI wyprowadzanego z danych satelitarnych SPOT Vegetation i MODIS NDVI posłużyły odpowiednio do analizy fenologii lasów w Indiach oraz do przestrzenno-czasowego modelowania zmian początku okresu wegetacyjnego na Svalbardzie (Prabakaran i in. 2013; Karlsen i in. 2014). Z kolei do badań fenologii roślin w Stanach Zjednoczonych porównywano możliwości wykorzystania szeregów czasowych NDVI oraz ulepszonych wskaźnika wegetacji *Enhanced Vegetation Index* (EVI) na bazie danych satelitarnych MODIS (Tan i in. 2011). W Polsce również badano możliwości zastosowania

danych satelitarnych MODIS EVI do wyznaczania początku i końca okresu wegetacyjnego dla obszarów w promieniu dziesięciu kilometrów od miejsca położenia trzech posterunków meteorologicznych na terenie Lubelszczyzny (Siłuch, Bartoszek 2012).

Celem niniejszej pracy jest określenie metodami teledetekcyjnymi czasowo-przestrzennego zróżnicowania okresu wegetacyjnego dla lasów liściastych w Polsce. Lasy liściaste strefy umiarkowanej cechują się wyraźną sezonowością, a tym samym są obszarem badawczym wskazanym do monitorowania sezonowych zmian tych lasów z poziomu satelitarnego. W toku badań zostały opracowane serie map przedstawiające czasowo-przestrzenny rozkład parametrów charakteryzujących okres wegetacji, tj. jego początek oraz koniec. Następnie przeprowadzono na poziomie krain przyrodniczo-leśnych analizę statystyczną w celu wykrycia i zbadania istotności tendencji zmian jego początku i końca wyznaczonego na podstawie szeregów czasowych wskaźnika NDVI. Na koniec wykonano analizę korelacji startu i końca okresu wegetacyjnego z obserwacjami meteorologicznymi, pozyskanymi z bazy serwisu Tutiempo.

MATERIAŁY I METODYKA

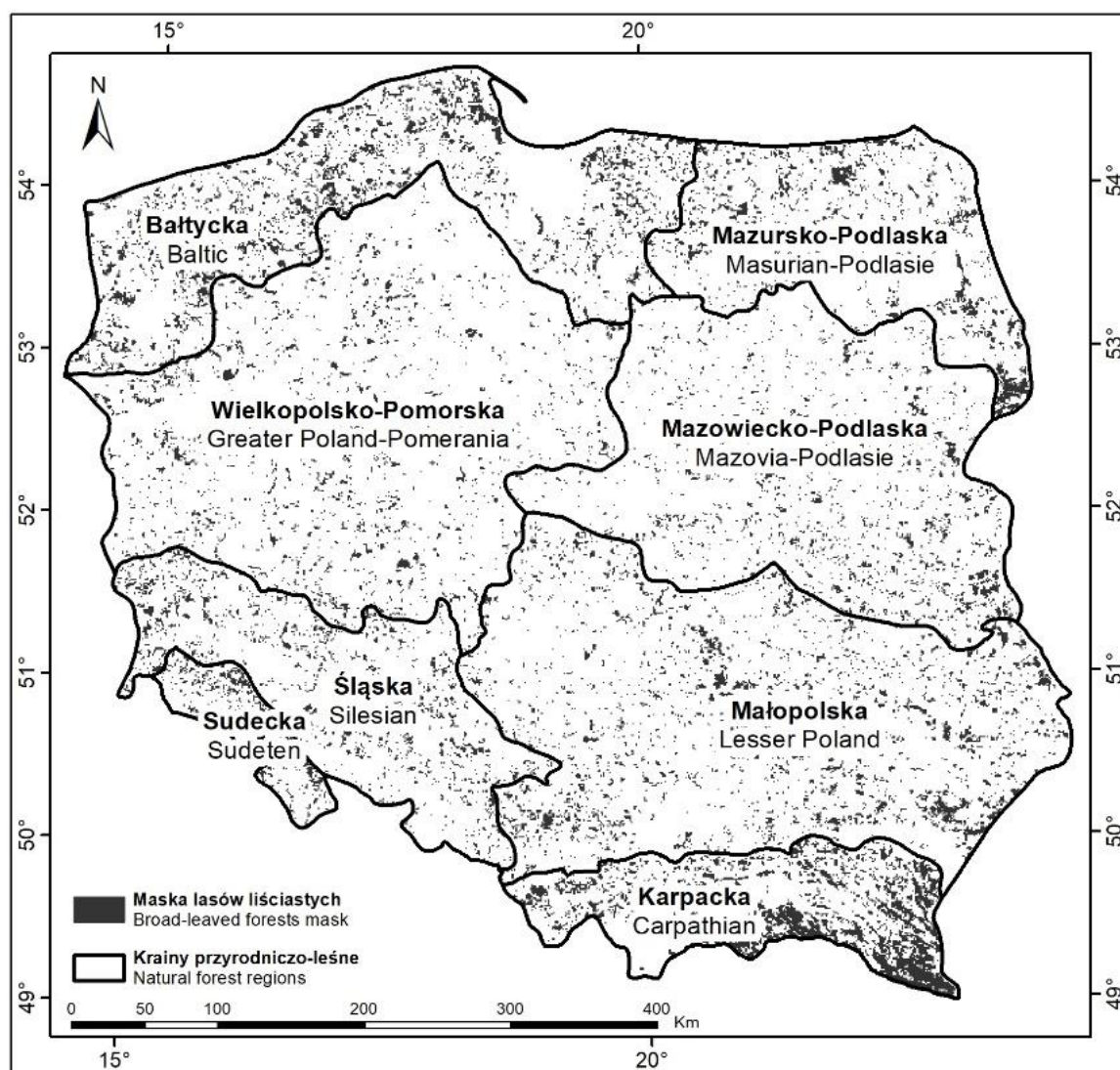
W niniejszej pracy zastosowano maskę obszarów leśnych, uprzednio opracowaną i weryfikowaną pod względem przebiegów wskaźnika wegetacji lasów liściastych w Polsce (Bartold 2016). Informację o zasięgu lasów liściastych w Polsce pozyskano z bazy danych o pokryciu terenu CORINE Land Cover (CLC), w ramach którego były wydzielone obszary o minimalnej powierzchni 25 ha oraz szerokości co najmniej 100 m (Ciołkosz, Bielecka 2005). Na podstawie najnowszej aktualizacji CLC 2012 (Hościło, Tomaszewska 2015) wybrano obszary pokryte lasami liściastymi. Według nomenklatury CORINE warunek ten spełniają klasy 311 i 313, z minimum 75% pokryciem lasów liściastych w klasie 311 oraz maksimum 25% pokryciem lasów liściastych w klasie 313 (*CORINE Land Cover nomenclature illustrated guide*). Następnie w procesie selekcji wprowadzono kryterium progu 50% powierzchni zajmowanej przez tereny leśne w obrębie piksela 1 km × 1 km, w celu minimalizacji błędów prawidłowego rozpoznania obszarów leśnych na korzyść graniczących z nimi terenów rolniczych i zabudowy. Kwestie wielkości błędu i uznania obszarów z 50% pokryciem powierzchni piksela był poruszany w pracy nad maską rolniczą dla potrzeb systemu prognozowania plonów w Polsce (Turlej i in. 2013). Badania nad maską rolniczą wykazały, że podniesienie kryterium progowego 60%, 70%, 80%, i 90% znacznie zredukowało liczebność pikseli, aczkolwiek pozwoliło na uzyskanie porównywalnych wartości średnich dla województw mimo ww. znacząco mniejszej ilości pikseli. Niemniej uznano, że uzyskane wyniki nie pozwoliły na zdecydowane stwierdzenie czy uzyskane wartości wskaźników roślinnych i temperaturowych VCI i TCI (wykorzystywanych do prognozowania plonów) dzięki nowej masce z podwyższonym progiem lepiej charakteryzują powierzchnię rolniczą niż z maski o stałym progu 50%. Wynika to przede wszystkim z jakości danych wejściowych, np. otrzymaniem serii zobrazowań częściowo zachmurzonych; stąd im większa liczebność próby (tj. maska o niższym progu) tym większe możliwości otrzymania ciągłych pomierzonych wartości wskaźników. Z kolei przyjęty w założeniach niniejszej pracy autorytatywny próg 50% jest powszechnie stosowany w programach środowiskowych i produktach do klasyfikowania form pokrycia terenu, takich jak CORINE Land Cover, czy GLOBCOVER 2009. W artykule dotyczącym maski leśnej (Bartold 2016) przedstawiono statystykę testu U Manna-Whitneya dla obszarów leśnych maskowanych z progiem $\geq 50\%$ i $< 50\%$. Wykazano, że spośród badanych lasów

w ośmiu krainach przyrodniczo-leśnych, dla Krainy Bałtyckiej i Krainy Mazursko-Podlaskiej otrzymano różnice istotne statystycznie. Są to krainy, gdzie zaobserwowano najczęstsze różnice pomiarów NDVI. Dlatego też uwzględniając powyższe rozważania, do badań nad okresem wegetacyjnym lasów uwzględniono minimalne kryterium progowe 50% zachowując założenia dokładności procesu geometryzacji zdjęć niskorozdzielczych do 0,5 piksela kilometrowego.

Na rycinie 1 przedstawiono mapę przestrzennego rozmieszczenia obszarów lasów liściastych. Na mapie zaznaczono również granice ośmiu krain przyrodniczo-leśnych, w obrębie których w niniejszym badaniu analizowano istotność tendencji zmian okresu wegetacji lasów liściastych. Granice krain przyrodniczo-leśnych zostały wyznaczone na podstawie zróżnicowania geologicznego, geomorfologicznego, klimatycznego, typów krajobrazów naturalnych oraz prowadzenia gospodarki leśnej (Zielony, Kliczkowska 2012). Taka regionalizacja, uwzględniająca czynniki klimatyczne wpływające na wegetację roślin, spełnia warunek przeprowadzenia niniejszych badań monitorowania okresu wzrostu i rozwoju lasów. Powierzchnie wybranych dla potrzeb badań lasów liściastych w krainach są następujące: 5391 km² w Krainie Bałtyckiej, 2973 km² w Mazursko-Podlaskiej, 3734 km² w Wielkopolsko-Pomorskiej, 3166 km² w Mazowiecko-Podlaskiej, 2430 km² w Śląskiej, 5601 km² w Małopolskiej, 858 km² w Sudeckiej oraz 5379 km² w Karpackiej. Suma powierzchni badanego obszaru leśnego wynosi 29532 km², co stanowi około 32% całkowitej powierzchni lasów w Polsce (tj. 91979 km² według danych GUS na rok 2014).

Materiałem badawczym wykorzystanym w pracy były wieloletnie obserwacje pozyskane z satelitów środowiskowych SPOT i Proba. Na ich pokładzie zostały umieszczone sensory Vegetation, rejestrujące promieniowanie elektromagnetyczne w czterech zakresach: niebieskim (447-493 nm), czerwonym (610-690 nm), bliskiej podczerwieni (777-893 nm) i średniej podczerwieni (1570-1650 nm). Misja satelity SPOT Vegetation rozpoczęła się w kwietniu 1998 roku i została zakończona w maju 2014 roku. Jej kontynuatorem został satelita Proba, również z sensoem Vegetation. Satelita Proba-V skanuje powierzchnię ziemską nieprzerwanie od października 2013 roku. Dane teledetekcyjne pozyskane ze SPOT Vegetation i Proba-V cechują się wysoką zgodnością pomiarów i mogą wzajemnie uzupełniać obserwacje środowiska przyrodniczego (Dierckx i in. 2015; Meroni i in. 2016).

W niniejszej pracy zostały uwzględnione szeregi czasowe wskaźnika wegetacji NDVI obejmujące lata 1999-2016. Znormalizowany wskaźnik wegetacji NDVI został wprowadzony w latach 70. XX w. i jest powszechnie wykorzystywany do analizy wigoru roślin oraz stanu ich rozwoju (Tucker 1979). Jest obliczany wg wzoru $NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED)$, gdzie NIR to współczynnik odbicia zarejestrowany w paśmie podczerwonym, a RED to współczynnik odbicia w paśmie czerwonym. Zakres wartości NDVI obejmuje od -1,0 do 1,0, przy czym wartości bliższe jedności wskazują na lepszą kondycję roślin. Do badań wykorzystano 576 kompozycji dziesięciodniowych wskaźnika NDVI, które były składane z dziennych obserwacji satelitarnych po maksymalnej wartości wskaźnika zaobserwowanej w danej dekadzie. Taka metoda składania obrazów jest kompromisem w pozyskaniu jak największej liczby danych niezachmurzonych nad obszarem Polski (Bochenek 1999). Kompozycje dekadowe o rozdzielczości przestrzennej 1 km × 1 km zostały pobrane bezpłatnie przez dedykowany portal Flamandzkiego Instytutu ds. Badań Technologicznych VITO.

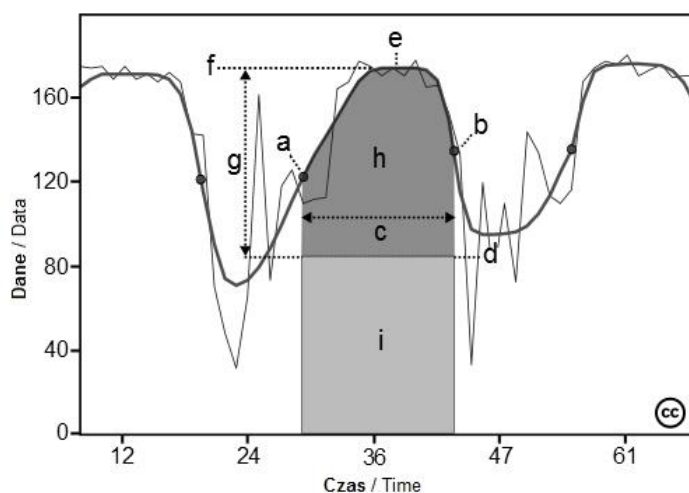


Ryc. 1. Maska $\geq 50\%$ lasów liściastych na tle krain przyrodniczo-leśnych
Fig. 1. Broad-leaved forests mask at $\geq 50\%$ overlaid natural-forest regions

Źródło Bartold (2016).
 Source: Bartold (2016).

Na podstawie szeregów czasowych NDVI obliczono parametry charakteryzujące okres wegetacji. W tym celu zastosowano oprogramowanie TIMESAT w wersji 3.2, które zawiera narzędzia do wygładzania funkcji szeregów czasowych pozyskanych z danych teledetekcyjnych (Jönsson, Eklundh 2002, 2004). W obliczeniach przyjęto wygładzanie metodą podwójnej funkcji logistycznej oraz wagowanie pomiarów wskaźnika wegetacji na podstawie informacji o użyteczności piksela. Takie dane odczytano na bazie kanału informacyjnego Status Map, dostarczanego obok kanałów odbiciowości z obserwacji satelitarnych SPOT Vegetation i Proba-V. W przypadku zaobserwowania chmury, cieni chmur i śniegu wartość pomiaru miała wagę 0. Z kolei skrajnie niskim wartościom wskaźnika NDVI w skali od 0,0 do 0,2, które wskazują odkrytą glebę, przypisano wagę 0,5. Podczas gdy wartości NDVI od 0,2 włącznie do 1,0, odpowiadające stanowi roślinności od suchej, słabej do zdrowej, zielonej w pełni okresu

wegetacyjnego, miały maksymalną wagę równą 1. Na podstawie wygładzonych danych teledetekcyjnych, w oprogramowaniu TIMESAT obliczono amplitudy NDVI w każdym roku kalendarzowym oraz definiowano parametry określające sezonowość. Ryc. 2 ilustruje schemat wyznaczania w TIMESAT poszczególnych parametrów sezonowości, czyli charakterystyk opisujących okres wegetacyjny, w tym początek, koniec, długość, środek, maksimum i amplitudę NDVI w okresie wegetacji. Na podstawie amplitudy wskaźnika wegetacji są ustalane kryteria progowe definiujące poziom wartości NDVI, na które przypadają daty początku i końca okresu wegetacyjnego. W tabeli 1 przedstawiono kryteria wyznaczania badań okresu wegetacyjnego lasów przeprowadzonych narzędziami teledetekcyjnymi przez grupy naukowców w Europie i Azji. W zależności od danych satelitarnych, metodyki wygładzania danych, obszarów badań, strefy klimatu i zróżnicowania gatunkowego drzewostanów wypracowano różne kryteria progowe amplitudy NDVI do wyznaczania początku i końca okresu wegetacyjnego lasów. W niniejszej pracy, na podstawie przeglądu literatury z tabeli 1, za start i koniec okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce przyjęto kryterium progu 0,35 amplitudy NDVI.



Ryc. 2. Parametry określające sezonowość w TIMESAT: (a) początek okresu wegetacyjnego, (b) koniec okresu wegetacyjnego, (c) długość okresu wegetacyjnego, (d) średnie minimalne NDVI przed i po okresie wegetacyjnym, (e) środek okresu wegetacyjnego, (f) maksimum NDVI w okresie wegetacji, (g) amplituda NDVI, (h) pole powierzchni h, (i) pole powierzchni h+i

Fig. 2. Seasonality parameters generated in TIMESAT: a) beginning of season, (b) end of season, (c) length of season, (d) base value, (e) time of middle season, (f) maximum value, (g) amplitude, (h) small integrated value, (i) large integrated value h+i

Źródło: Jönsson, Eklundh 2004.

Source: Jönsson, Eklundh 2004.

Tabela 1. Przegląd literatury wyznaczania metodami teledetekcyjnymi okresu wegetacyjnego lasów
Table 1. Overview on remote-sensing based methods of determining the growing season of forests

| Autorzy/ Authors | Obiekt i obszar badań/ Object and study area | Dane satelitarne/ Satellite data | Wskaźnik wegetacji/ Vegetation index | Wyglądanie danych/ Smoothing data | Start (a) i koniec (b) okresu wegetacyjnego/ Start (a) and the end (b) of growing season |
|------------------------------|---|---|---|--|---|
| Tuanmu M.N. i in., 2010 | Podszycie lasu, Chiny | MODIS kompozycje 8-dniowe | WDRVI | Filtr Savitzky-Golay | (a) 0,2 (b) 0,2 |
| Yu X. i in., 2014 | Lasy liściaste i iglaste, Chiny | MODIS kompozycje 8-dniowe | EVI | Funkcja podwójna logistyczna | (a) 0,2 (b) 0,27 |
| Prabakaran C. i in., 2013 | Lasy liściaste okresowo/wiecznie zielone, Indie | SPOT VGT kompozycje 10-dniowe | NDVI | Filtr Savitzky-Golay | (a) 0,1 (b) 0,1 |
| Jönsson P., Eklundh L., 2002 | Lasy w Afryce | NOAA AVHRR kompozycje 10-dniowe | NDVI | Filtr Gaussa | (a) 0,1 (b) 0,1 |
| Senf C. i in., 2013 | Lasy liściaste okresowo/wiecznie zielone, Chiny | MODIS kompozycje 16-dniowe | EVI | Funkcja podwójna logistyczna | (a) 0,5 (b) 0,5 |
| Gupta U., 2014 | Wilgotne lasy równikowe, Indie | MODIS kompozycje 16-dniowe | EVI | Filtr Savitzky-Golay | (a) 0,3 (b) 0,3 |
| Han Q. i in., 2013 | Lasy liściaste, iglaste, Norwegia | SPOT VGT kompozycje 10-dniowe | NDVI | Funkcja logistyczna | (a) 0,2 (b) 0,2 |
| Beck P. i in., 2006 | Lasy liściaste, iglaste oraz zarośla, pn. Skandynawia | MODIS kompozycje 16-dniowe | NDVI | Funkcja podwójna logistyczna, filtr Gaussa | Punkt przegięcia |
| Tan B., 2011 | Roślinność na pustyni i półpustyni USA i Meksyk | MODIS kompozycje 8-dniowe | NDVI, EVI | Trzecia pochodna funkcji | (a) 0,2 (b) 0,2 |
| O'Connor B. i in., 2012 | Lasy liściaste, iglaste i mieszane CLC2006, Irlandia | MERIS kompozycje 10-dniowe | MGVI | Filtr Gaussa | (a) 0,2 |
| Jonsson A. i in., 2010 | Lasy iglaste, Szwecja | MODIS kompozycje 8-dniowe | NDVI, WDRVI | Funkcja podwójna logistyczna, filtr Savitzky-Golay | (a) cztery dni pod rząd z temp. > 5°C |

Zródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Wszystkie parametry sezonowości były obliczone dla każdego piksela maski lasów oraz nadto zostały uśrednione w granicach ośmiu krain przyrodniczo-leśnych. Mając uśrednione – w obrębie krain przyrodniczo-leśnych – wartości startu i końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych przystąpiono do sprawdzenia istotności tendencji ich zmian w latach 1999-2016. Dodatkowo sprawdzono, czy i o ile zmieniała się w okresie osiemnastu lat maksymalna wartość wskaźnika NDVI pomierzona w okresie wegetacyjnym. Do wykrycia i weryfikacji hipotezy o braku trendu w danych zastosowano test nieparametryczny Manna-Kendalla, który analizuje znak różnicy między kolejno zmierzonymi wartościami. Statystyka (S) testu Manna-Kendalla obliczana jest z zależności:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

gdzie:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{dla } x > 0 \\ 0 & \text{dla } x = 0 \\ -1 & \text{dla } x < 0 \end{cases}$$

$\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - zbiór danych w postaci szeregu czasowego.

W tym teście nieparametrycznym współczynnikiem korelacji rangowej ciągu danych $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ oraz ciągu odpowiadającej im jednostki czasu $\{1, 2, \dots, n\}$ jest współczynnik tau Kendalla (τ) wyrażony:

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2}$$

który przyjmuje wartości z zakresu od -1 do 1. Duże wartości dodatnie współczynnika tau świadczą o występowaniu trendu rosnącego, natomiast duże wartości ujemne przemawiają za występowaniem trendu malejącego. Wartości bliskie zera świadczą o braku trendu. W niniejszej pracy za zmianę istotną malejącą lub rosnącą przyjęto zmianę na poziomie ufności powyżej 95% ($\alpha < 0,05$). Jeżeli istotność testu (p-wartość) jest większa niż przyjęty w badaniach poziom istotności 0,05, to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, która zakłada brak trendu.

Do zbadania relacji między startem i końcem okresu wegetacyjnego a warunkami pogodowymi wykorzystano bezpłatne, codzienne obserwacje meteorologiczne z bazy serwisu Tutiempo, umieszczonej na stronie internetowej <https://www.tutiempo.net>. Odczytano informacje o maksymalnej temperaturze dobowej i dobowych sumach opadu atmosferycznego ze stacji synoptycznych rozmieszczonych na terenie Polski i w jej sąsiedztwie. W siatce 1 km x 1 km zostały wyinterpolowane dziesięciodniowe obrazy zawierające informacje o maksymalnych temperaturach i sumie opadów. Do opracowania obrazów rozkładów temperatury wykorzystano metodę (Dodson, Marks 1997), w której redukuje się temperaturę rzeczywistą do poziomu morza zgodnie z gradientem wilgotnoadiabatyycznym 0,6°C/100 m. Następnie wykonano interpolację uzyskanej temperatury przy użyciu *krigingu* i wprowadzono ostateczną wartość temperatury na poziom rzeczywisty uwzględniając ponownie gradient wilgotnoadiabatyyczny. Z kolei do interpolacji sum opadów atmosferycznych użyto metody wieloboków Thiessena. Metodę przetwarzania danych klimatycznych Tutiempo wzorowano na pracy (Musiał 2009), w której to stosowano ją do badań środowiska przyrodniczego na obszarach

prawnie chronionych w Polsce. Te same obserwacje meteorologiczne z powodzeniem były wykorzystywane również do badania kondycji lasów w północno-wschodniej i południowo-zachodniej Polsce (Bochenek i in. 2015).

Aby ocenić, czy istniał wpływ warunków meteorologicznych na zmieniające się w czasie daty rozpoczęcia i zakończenia okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce, przeprowadzono analizę korelacji w trzech wariantach: 1) między uśrednionymi wartościami temperatury maksymalnej oraz sumami opadów w okresie styczeń-marzec a startem okresu wegetacyjnego lasów; 2) między uśrednionymi wartościami temperatury maksymalnej oraz sumami opadów w marcu a startem okresu wegetacyjnego lasów; 3) między uśrednionymi wartościami temperatury maksymalnej oraz sumami opadów w trzeciej dekadzie marca a startem okresu. Schemat analizy wpływu warunków atmosferycznych powtórzono dla zbadania zmian końca okresu wegetacyjnego lasów, z uwzględnieniem obserwacji meteorologicznych w okresie sierpień-październik, w październiku i w trzeciej dekadzie października. Ponieważ wyżej wymienione zmienne miały rozkłady zbliżone do rozkładu normalnego, obliczono współczynniki korelacji liniowej r Pearsona wg wzoru:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

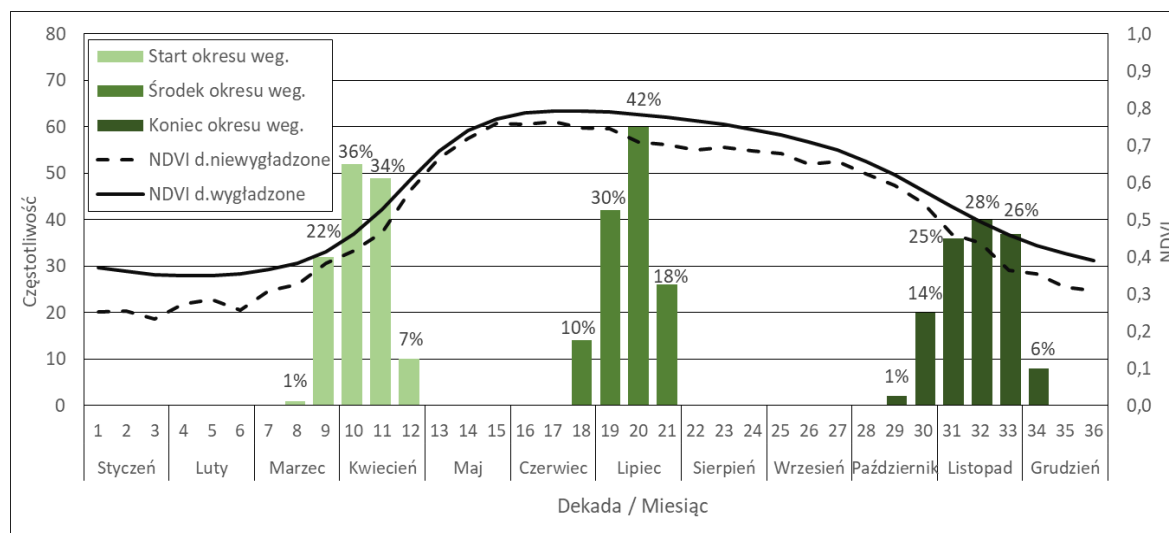
gdzie $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

Silę korelacji sklasyfikowano następująco: $0,0 \leq r \leq 0,2$ – brak związku liniowego, $0,2 < r \leq 0,4$ – słaba zależność, $0,4 < r \leq 0,7$ – umiarkowana zależność, $0,7 < r \leq 0,9$ – silna zależność, $0,9 < r \leq 1,0$ – bardzo silna zależność.

WYNIKI BADAŃ I Dyskusja

Ryc. 3 przedstawia zmienność czasową początku, środka i końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce w latach 1999-2016. Linia przerywana przedstawia przebieg wartości NDVI obliczonych na podstawie danych bez filtra wygładzania, w odstępach dekadowych i uśrednionych dla ww. okresu badawczego. Z kolei linia ciągła pokazuje przebieg wartości wskaźnika wegetacji NDVI lasów liściastych po zastosowaniu filtra wygładzania danych satelitarnych. Rozkłady histogramów startu, środka i końca okresu wegetacyjnego są zbliżone do rozkładu normalnego. Początek okresu wegetacyjnego występował najczęściej w ostatniej dekadzie marca (36% wszystkich obserwacji) lub w pierwszej dekadzie kwietnia (34% ogółem). Z kolei środek okresu wegetacyjnego występował w lipcu, w pierwszej dekadzie (30% ogółem z wszystkich obserwacji) i w drugiej dekadzie miesiąca (42% wszystkich obserwacji). Histogram dla końca okresu wegetacji jest rozłożony, gdyż koniec wyznaczono niemalże równomiernie w listopadzie, w pierwszej dekadzie 25% ogółem obserwacji, w drugiej dekadzie 28% ogółem obserwacji i w trzeciej dekadzie 26% ogółem obserwacji. Co więcej, rozpoznano ekstremalnie wczesny termin początku i końca (po 1% obserwacji ogółem). Odnotowano również wyraźnie opóźnienie początku okresu, przypadające na ostatnie dziesięć dni kwietnia (7% obserwacji ogółem), jaki i opóźnienie końca wegetacji lasów z 6% obserwacji ogółem). Odstające terminy początku

i końca okresu wegetacji mogą być wyjaśnione jakością danych satelitarnych, tj. brakiem szeregu bezchmurnych zobrażeń przez dłuższy okres np. miesiąca co może implikować błędy algorytmu w wygładzaniu danych i wyznaczaniu terminu startu czy końca okresu wegetacyjnego.



Ryc. 3. Zróżnicowanie czasowe początku, środka i końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce, wraz z przebiegami dekadowych wartości wskaźnika wegetacji NDVI w latach 1999-2016

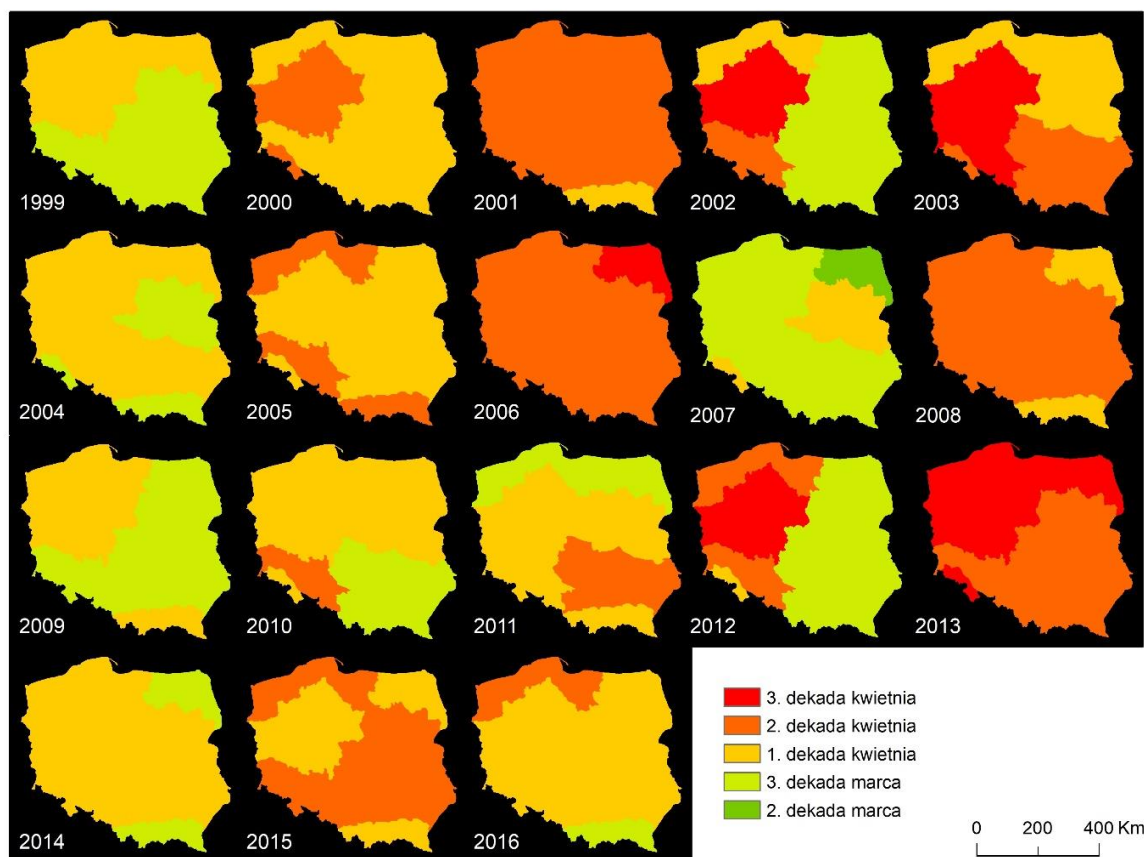
Fig. 3. Temporal distribution of the onset, the middle and the end of the growing season over broadleaved forests in Poland, with decadal vegetation index NDVI in 1999-2016

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Na rycinach 4 i 5 przedstawiono rozkłady początku oraz końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych, uśrednione dla ośmiu krain przyrodniczo-leśnych Polski w latach 1999-2016. Wartości początku i końca okresu wegetacyjnego odpowiadają konkretnej dekadzie w danym miesiącu. Legenda wraz z atrybutem kolorów została dobrana na podstawie opracowania Vrieling i in. (2016), zajmujących się badaniami różnorodności biologicznej z wykorzystaniem danych satelitarnych.

Kluczowym zagadnieniem w fenologii roślin jest obserwacja początku okresu wegetacji (Kluza, Zientarska 1999; Karlsen i in. 2014). Na podstawie rozkładów z ryciny 4 zaobserwowano, że start okresu wegetacyjnego w wielu przypadkach wystąpił przed pierwszym kwietnia, czyli przed terminem umownym początku wegetacji lasów, stosowanym w leśnictwie. Odnotowano że w latach 2002 i 2012 wystąpił on w trzeciej dekadzie marca wyraźnie we wszystkich wschodnich krainach przyrodniczo-leśnych Polski, tj. Mazursko-Podlaskiej, Mazowiecko-Podlaskiej, Małopolskiej i Karpackiej. Z kolei w latach 1999, 2007 i 2009 start wegetacji w trzeciej dekadzie marca wystąpił już w większości krain Polski, tj. w Krainie Mazowiecko-Podlaskiej, Małopolskiej, Śląskiej, Sudeckiej i Karpackiej w 1999 roku, w Pomorskiej, Wielkopolsko-Pomorskiej, Śląskiej, Małopolskiej i Karpackiej w 2007 roku oraz w Mazursko-Podlaskiej, Mazowiecko-Podlaskiej, Małopolskiej, Śląskiej i Sudeckiej w 2009 roku. Jedyne skrajne przypadki wyznaczonego startu wegetacji na pierwszą dekadę marca odnotowano w 2007 roku dla Krainy Mazursko-Podlaskiej. Może to wynikać z faktu, że w roku 2007 dla wszystkich lasów liściastych krain przyrodniczo-leśnych w Polsce odnotowano relatywnie wczesny start okresu wegetacji w porównaniu do lat następnych.



Ryc. 4. Czasowo-przestrzenny rozkład początku okresu wegetacyjnego lasów liściastych w krainach przyrodniczo-leśnych

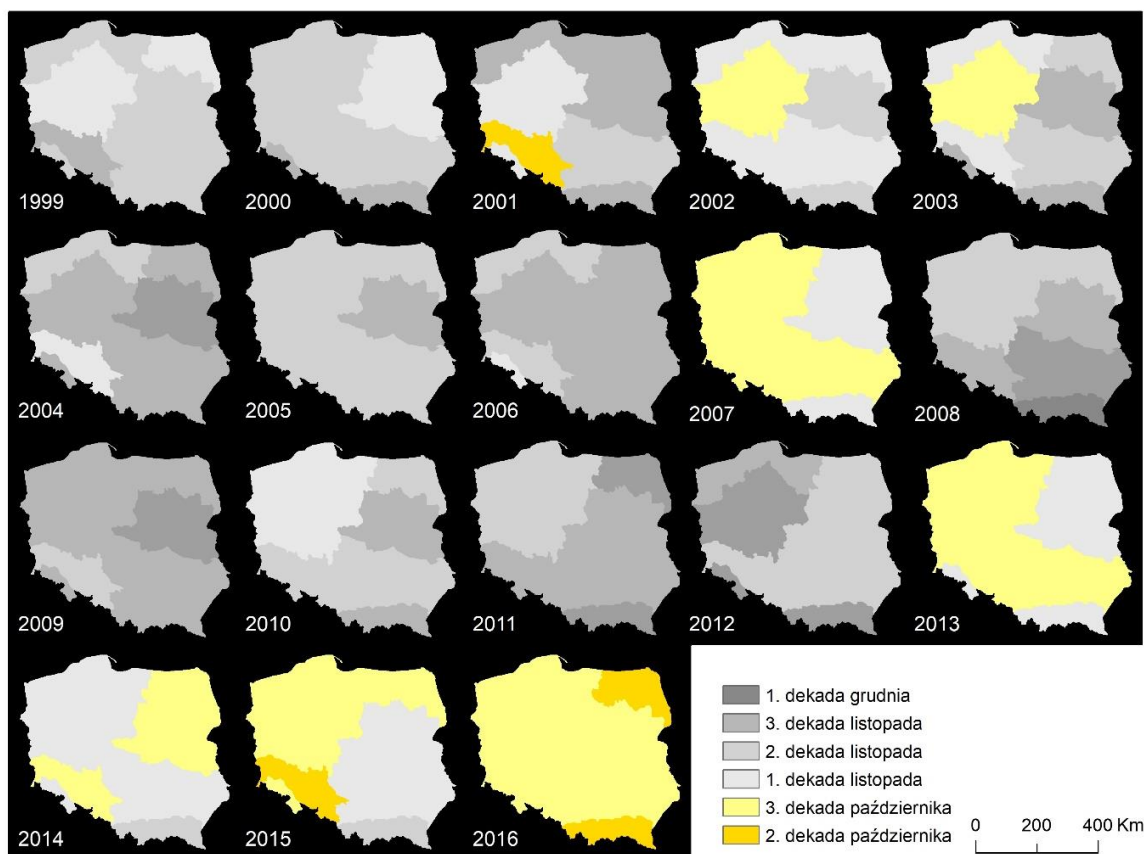
Fig. 4. Spatio-temporal distribution of the start of the growing season in broad-leaved forests within natural-forest regions

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

Zaobserwowano również lata i miejsca, w których początek okresu wegetacyjnego znacznie się opóźnił i wystąpił dopiero w drugiej lub trzeciej dekadzie kwietnia, a więc o 20-30 dni później po umownym terminie 1 kwietnia. W latach 2006 i 2013 odnotowano wyraźne opóźnienie startu wegetacji lasów liściastych we wszystkich krainach przyrodniczo-leśnych. Z kolei w latach 2003 i 2008 zaobserwowano w większości krain opóźnienie startu o jedną lub dwie dekady. Wyznaczone rozpoczęcie wegetacji lasów w latach 2006 i 2013 potwierdzają wyniki prac nad analizą wpływu wskaźników klimatycznych nad przebiegami wskaźnika NDVI z danych satelitarnych NOAA AVHRR (Bochenek i in. 2015). Badania naukowców wykazały, że w tych latach dla lasów Puszczy Augustowskiej, Knyszyńskiej i Białowieskiej, a więc obszarów Krainy Mazursko-Podlaskiej, wskaźnik NDVI był na poziomie 0,3, to jest poziomie oznaczającym suchą lub słabą roślinność bez liści. Dopiero pod koniec kwietnia lasy tych Puszczy przechodziły w okres wegetacji, wówczas NDVI miało wartość 0,65. Było to spowodowane niesprzyjającymi warunkami atmosferycznymi do rozwoju roślin w marcu, w tym niskimi wartościami temperatury powietrza wokół 0°C. Te wyniki wskaźnika

NDVI z dwóch lat były zestawiane z rokiem 2014, w którym to wegetacja rozpoczęła się już w pierwszych dniach kwietnia i odnotowano wzrost i rozwój lasów na poziomie NDVI = 0,6. W niniejszych badaniach również potwierdzono, że w 2014 roku w większości krain odnotowano start okresu wegetacyjnego w pierwszej dekadzie kwietnia. Jedynie w Krainie Mazursko-Podlaskiej i Karpackiej zaobserwowano w ostatniej dekadzie marca wcześniejszy start wegetacji lasów.

W przypadku końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych w latach 1999-2016 (ryc. 5) zauważono, że w większości obszarów leśnych występuje od pierwszej do trzeciej dekady listopada. Skrajny przypadek końca wegetacji lasów liściastych już na początku października odnotowano w Krainie Śląskiej w 2001 roku. Stąd też wskazane było przeprowadzenie analizy z wykorzystaniem danych meteorologicznych do oceny, na ile warunki atmosferyczne mogły wpłynąć na przyspieszenie końca wegetacji roślin, tak jak w pojedynczym przypadku z 2001 roku. Z kolei w latach 2007 i 2013 zaobserwowano przyspieszenie końca sezonu wegetacji lasów liściastych w trzeciej dekadzie października, a przestrzennie prawie w tych samych krainach przyrodniczo-leśnych, tj. Pomorskiej, Wielkopolsko-Pomorskiej, Śląskiej, Małopolskiej oraz dodatkowo Sudeckiej w 2007.



Ryc. 5. Czasowo-przestrzenny rozkład końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych w krainach przyrodniczo-leśnych

Fig. 5. Spatio-temporal distribution of the end of the growing season in broad-leaved forests within natural-forest regions

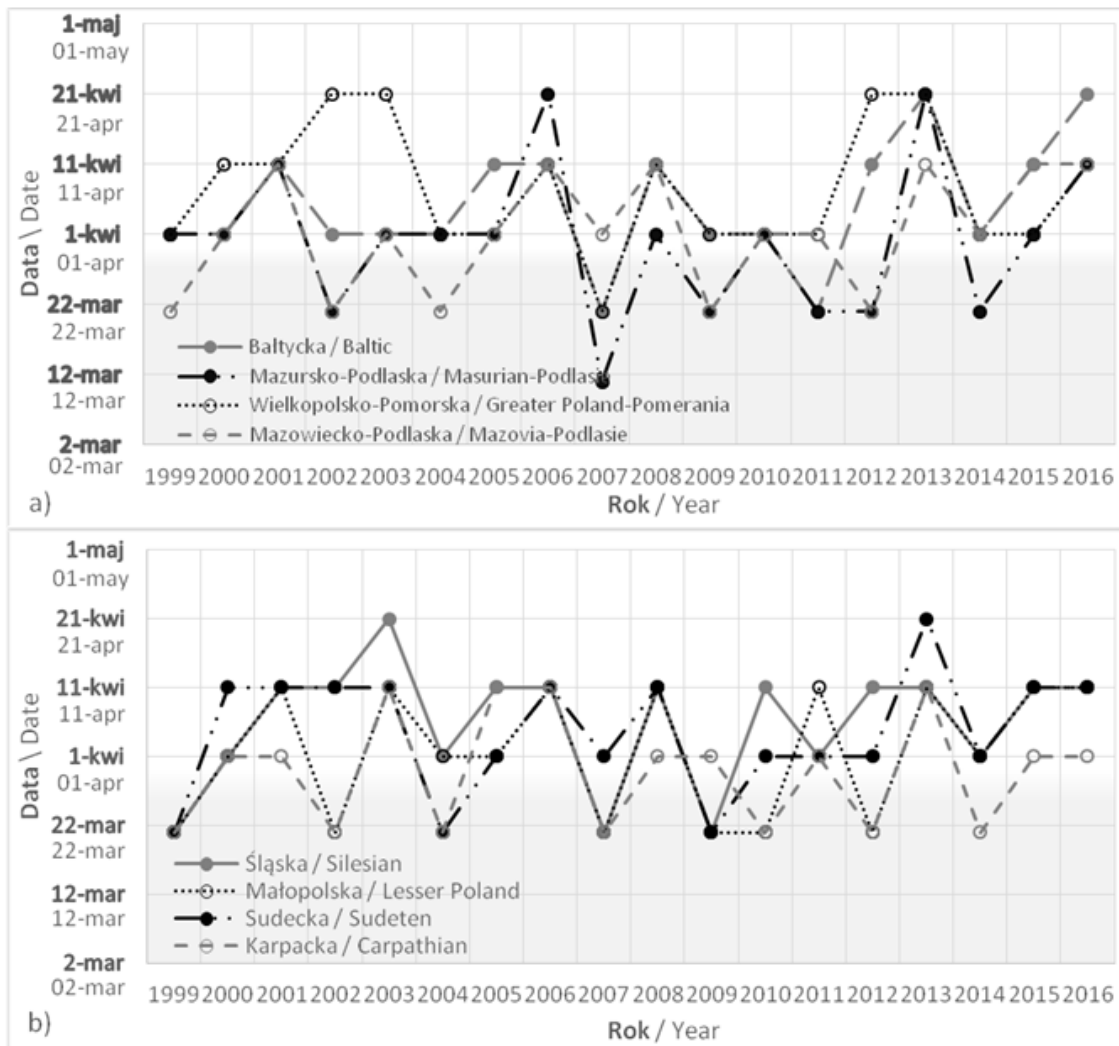
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

Ryciny 6 i 7 przedstawiają profile zmian początków i końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce w latach 1999-2016. Na osi X zestawiono lata, natomiast na osi Y podano daty w odstępach dziesięciodniowym, zgodnym z dekadowymi kompozycjami obserwacji satelitarnych. Każdy z parametrów sezonowości, tj. start i koniec wyznaczono dla ośmiu regionów przyrodniczo-leśnych Polski na podstawie osiemnastoletnich obserwacji satelitarnych. Stąd też suma obserwacji dla każdego parametru wynosi 144.

Śledząc przebieg zmian początku okresu wegetacyjnego (ryc. 6), odnotowano trzydzieści trzy przypadki przyspieszonego startu wegetacji przed pierwszym kwietnia, co stanowi prawie 23% wszystkich obserwacji. W 2007 roku start wegetacji wyznaczono w drugiej i trzeciej dekadzie marca w sześciu krainach przyrodniczo-leśnych. Jedynie w Krainie Mazowieckiej i Sudeckiej początek sezonu został zdefiniowany w pierwszej dekadzie kwietnia. Z kolei w latach 1999, 2002, 2009 przyspieszenie wegetacji zostało rozpoznane w pięciu krainach przyrodniczo-leśnych. Przyspieszenie wegetacji we wspomnianych latach wskazuje na występowanie w marcu sprzyjających warunków do wzrostu i rozwoju lasów liściastych w dominującej części kraju. Z kolei w latach 2000, 2005 i 2014 zaobserwowano, że początek sezonu wegetacyjnego w większości obszarów leśnych wystąpił w pierwszej dekadzie kwietnia.

Natomiast śledząc koniec okresu wegetacji w latach 1999-2016 (ryc. 7) odnotowano dziewięć przypadków końca wegetacji w październiku, co stanowi 13,2% wszystkich obserwacji. Z kolei dziewięć razy odnotowano koniec wegetacji w grudniu, co stanowi 7,0% pomiarów ogółem. W pozostałych przypadkach, które stanowią 80,5% wszystkich obserwacji, koniec wegetacji wyznaczono w listopadzie. Wyraźne przyspieszenie wegetacji w marcu 2007 roku implikowało jego skrócenie i zakończenie w październiku oraz na początku listopada. Godny uwagi jest kolejny rok 2008, w którym to w południowych krainach Polski, tj. Śląskiej, Małopolskiej, Sudeckiej i Karpackiej odnotowano późniejsze zakończenie wegetacji pod koniec listopada i w grudniu. Stąd też wskazane było przeprowadzenie dodatkowych badań z wykorzystaniem naziemnych obserwacji meteorologicznych do weryfikacji wyników parametrów sezonowości występujących w wybranych latach i obszarach leśnych. Takie obserwacje jak maksymalna temperatura powietrza oraz opady atmosferyczne były przydatne do oceny wpływu warunków atmosferycznych na przyspieszenie lub opóźnienie początku i końca wegetacji lasów liściastych.

Następnie przeprowadzono test statystyczny Manna-Kendalla do weryfikacji hipotezy o braku trendu w wegetacji lasów na podstawie współczynnika korelacji tau. W tabeli 2 zilustrowano wyniki analizy statystycznej tendencji zmian początku i końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych w krainach przyrodniczo-leśnych Polski. Wytluszczone wartości przedstawiają istotność testu. We wszystkich krainach uzyskano wyniki testu powyżej poziomu istotności 0,05, a więc odnotowano brak trendu w danych. Dla pomiarów w Krainach Mazursko-Podlaskiej, Wielkopolsko-Pomorskiej oraz Karpackiej, ryzyko odrzucenia hipotezy zerowej, gdy ona jest prawdziwa, wynosi powyżej 80%. Z kolei najniższe wartości ryzyka odrzucenia hipotezy zerowej 14,4% oraz 17,8% odnotowano odpowiednio dla Krainy Mazowiecko-Podlaskiej i Bałtyckiej. Wartości współczynnika tau we wszystkich krainach były bliskie 0 i potwierdzają one brak tendencji.

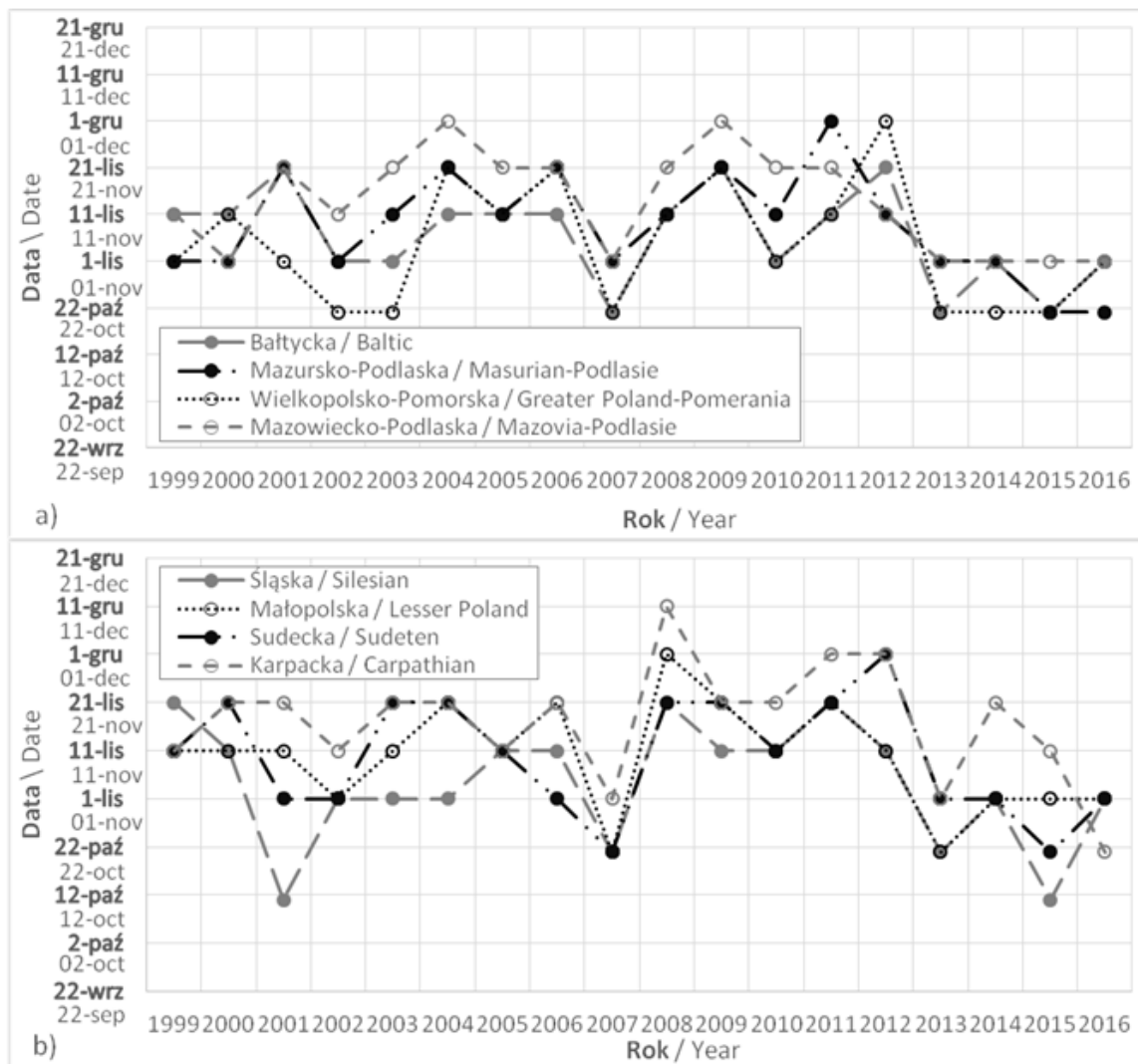


Ryc. 6. Początek sezonu wegetacyjnego lasów liściastych w krainach przyrodniczo-leśnych w 1999-2016

Fig. 6. Start of the growing season in broad-leaved forests within natural-forest regions in 1999-2016

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 7. Koniec sezonu wegetacyjnego lasów liściastych w krainach przyrodniczo-leśnych w 1999-2016

Fig. 7. End of the growing season in broad-leaved forests within natural-forest regions in 1999-2016

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

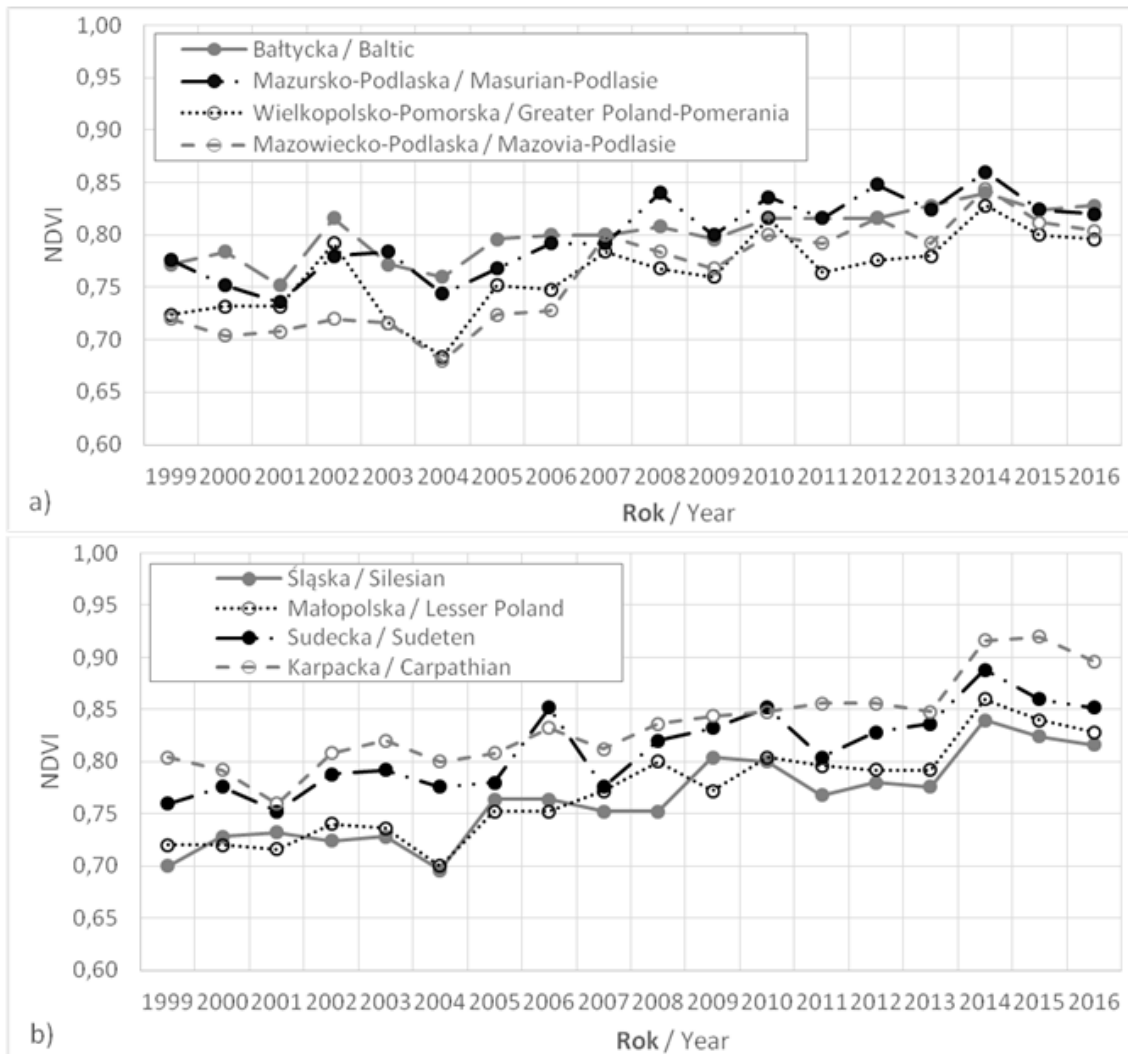
Tabela 2. Tendencje zmian wegetacji lasów liściastych w krainach przyrodniczo-leśnych w latach 1999-2016**Table 2.** Trends of the growing season in broad-leaved forests within natural-forest regions in 1999-2016

| Start okresu wegetacyjnego/ Start of the growing season | Baltycka/ Baltic | Mazursko-Podlaska/ Masurian-Podlasie | Wielkopolsko-Pomorska/ Greater Poland-Pomerania | Mazowiecko-Podlaska/ Mazovia-Podlasie | Śląska/ Silesian | Małopolska/ Lesser Poland | Sudecka/ Sudeten | Karpacka/ Carpathian |
|--|---------------------|---|--|--|---------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Tau Kendalla/ Kendall's tau | 0,264 | -0,054 | -0,038 | 0,289 | 0,122 | 0,190 | 0,086 | 0,024 |
| Statystyka testu/ Test statistic | 34,000 | -7,000 | -5,000 | 37,000 | 15,000 | 24,000 | 11,000 | 3,000 |
| Wariancja/ Variance | 601,33 3 | 606,333 | 613,000 | 607,667 | 559,66 7 | 594,667 | 559,66 7 | 559,66 7 |
| p-wartość/ p-value | 0,178 | 0,807 | 0,872 | 0,144 | 0,554 | 0,346 | 0,683 | 0,935 |
| Poziom istotności/ Alpha level | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Koniec okresu wegetacyjnego/ End of the growing season | | | | | | | | |
| Tau Kendalla/ Kendall's tau | -0,255 | -0,029 | -0,203 | -0,253 | -0,152 | -0,185 | -0,156 | -0,118 |
| Statystyka testu/ Test statistic | -34,000 | -4,000 | -28,000 | -34,000 | -21,000 | -25,000 | -21,000 | -16,000 |
| Wariancja/ Variance | 628,66 7 | 651,333 | 651,333 | 631,333 | 651,66 7 | 634,333 | 635,66 7 | 634,00 0 |
| p-wartość/ p-value | 0,188 | 0,906 | 0,290 | 0,189 | 0,433 | 0,341 | 0,428 | 0,551 |
| Poziom istotności/ Alpha level | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Następnie sprawdzono, czy w latach 1999-2016 zaobserwowano zmiany w maksymalnych wartościach wskaźnika NDVI w wyznaczonych uprzednio okresach wegetacyjnych lasów liściastych. Ryc. 7 przedstawia przebieg zmian wskaźnika NDVI w lasach w obrębie ośmiu krain przyrodniczo-leśnych. W okresie 1999-2016 wartości wskaźnika wegetacji, pomijając pojedyncze obserwacje, sukcesywnie rosną. Przedstawione w tabeli 3 wyniki analizy statystycznej Manna-Kendalla potwierdzają wystąpienie wyraźnego trendu rosnącego. Najbardziej istotne tendencje zmian zaobserwowano dla Krainy Karpackiej ($\tau = 0,819$), Małopolskiej ($\tau = 0,722$) oraz Bałtyckiej ($\tau = 0,710$). Wyniki te wskazują stały wzrost i rozwój roślin, niezależnie od składu gatunkowego, wieku drzewostanów i gospodarki leśnej.



Ryc. 8. Maksimum NDVI w okresie wegetacyjnym lasów liściastych w krainach przyrodniczo-leśnych Polski

Fig. 8. Maximum NDVI observed during the growing season in broad-leaved forests within natural-forest regions

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Tabela 3. Tendencje zmian maksimum NDVI w okresie wegetacyjnym lasów liściastych w krainach przyrodniczo-leśnych Polski w latach 1999-2016

Table 3. Trends of the maximum NDVI in the growing season in broad-leaved forests within natural-forest regions in the period 1999-2016

| Maksimum NDVI w okresie wegetacyjnym/ Maximum NDVI in the growing season | Bałtycka/ Baltic | Mazursko-Podlaska/ Masurian-Podlasie | Wielkopolsko- Pomorska/ Greater Poland-Pomerania | Mazowiecko-Podlaska/ Mazovia-Podlasie | Śląska/ Silesian | Małopolska/ Lesser Poland | Sudecka/ Sudeten | Karpacka/ Carpathian |
|---|---------------------|---|--|--|---------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Tau Kendalla/ Kendall's tau | 0,710 | 0,564 | 0,625 | 0,700 | 0,687 | 0,722 | 0,660 | 0,819 |
| Statystyka testu/ Test statistic | 105,000 | 86,000 | 95,000 | 106,000 | 104,000 | 109,000 | 99,000 | 124,000 |
| Wariancja/ Variance | 684,333 | 696,000 | 695,000 | 694,000 | 694,000 | 693,000 | 689,667 | 694,000 |
| p-wartość/ p-value | < 0,0001 | 0,001 | 0,000 | < 0,0001 | < 0,0001 | < 0,0001 | 0,000 | < 0,0001 |
| Poziom istotności/ Alpha level | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Na zakończenie przeprowadzono analizę korelacji pomiędzy warunkami meteorologicznymi a początkiem i końcem okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce w latach 1999-2016. Zbadano, czy istnieje wpływ maksymalnych temperatur powietrza oraz sum opadów atmosferycznych na trzy miesiące przed startem, na miesiąc przed i dekadę przed startem okresu. W pracy przyjęto założenie, że (Bochenek i in. 2015), że temperatury powietrza zimą i wczesną wiosną mogą mieć istotny wpływ na stan rozwoju drzewostanów liściastych, a tym samym determinować początek okresu wegetacyjnego. Tabela 4 przedstawia wyniki dla relacji startu okresu wegetacyjnego z temperaturą maksymalną i opadami w latach 1999-2016. W prawie wszystkich pomiarach warunków termicznych odnotowano ujemną zależność, mówiącą o tym, że im wyższa temperatura maksymalna, tym przyspieszony, wcześniejszy start okresu wegetacyjnego. Silną zależność odnotowano dla Krainy Mazursko-Podlaskiej i Karpackiej, tj. odpowiednio -0,709 oraz -0,761 zestawiając marcowe temperatury maksymalne z datami początku okresu wegetacyjnego. Pozostając przy temperaturze maksymalnej, umiarkowaną zależność na poziomie $0,4 < r \leq 0,7$ odnotowano w większości krain z wyjątkiem Krainy Śląskiej, Wielkopolsko-Pomorskiej oraz Mazowiecko-Podlaskiej. W tych dwóch ostatnich odnotowano słabą zależność, na poziomie niewiele niższym niż -0,4, tj. odpowiednio -0,376 oraz -0,366. Aczkolwiek, uwzględniając warunki termiczne w ostatnich dziesięciu dniach marca w latach 1999-2016 najlepszą korelację - na poziomie -0,619 – uzyskano dla Krainy Mazursko-Podlaskiej. Natomiast wyniki korelacji z wykorzystaniem sum opadów atmosferycznych wykazały, że jedynie w Krainie Śląskiej odnotowano umiarkowaną siłę relacji, niezależnie od tego czy to były sumy opadów brane z trzech miesięcy, ostatniego miesiąca czy z dekady przed startem okresu

wegetacyjnego. W zdecydowanej większości odnotowano brak związku liniowego między sumami opadów atmosferycznych na start okresu wegetacyjnego. Zróżnicowane wyniki korelacji, prezentowane w tabeli 4 wykazały, że siły zależności są determinowane zestawem obserwacji meteorologicznych (trzymiesięcznych, miesięcznych i dekadowych), danym regionem (krajem) i parametrem (temperatura maksymalna, opady). Stąd też do modelowania początku okresu wegetacyjnego dla Krainy Mazursko-Podlaskiej i Karpackiej są wskazane dane termiczne z marca, dla Krainy Bałtyckiej dane termiczne z ostatniej dekady marca, a dla Krainy Śląskiej sumy opadów styczeń-marzec. Jeszcze inne sumy opadów, z ostatniej dekady marca, mogą być przydatne do modelowania startu okresu w Krainie Wielkopolsko-Pomorskiej.

Tabela 1. Korelacje między startem okresu wegetacyjnego a maksymalną temperaturą powietrza oraz opadami w latach 1999-2016. Siła korelacji: $0,0 \leq r \leq 0,2$ – brak związku liniowego, $0,2 < r \leq 0,4$ – słaba zależność, $0,4 < r \leq 0,7$ – umiarkowana zależność, $0,7 < r \leq 0,9$ – silna zależność, $0,9 < r \leq 1,0$ – bardzo silna zależność

Table 1. Correlation between the start of the season and maximum air temperature and rainfall in 1999-2016. Size of correlation: $0,0 \leq r \leq 0,2$ – no correlation, $0,2 < r \leq 0,4$ – low correlation, $0,4 < r \leq 0,7$ – medium correlation, $0,7 < r \leq 0,9$ – high correlation, $0,9 < r \leq 1,0$ – very high correlation

| r(Start okresu weget., max. temp. pow./ r(start of season, max. air temp.)) | Styczeń-marzec / january-march | Marzec / march | Marzec trzecia dekada / march 3rd dekad | r(Start okresu weget., opady)/ r(start of season, rainfall) | Styczeń-marzec / january-march | Marzec / march | Marzec trzecia dekada / march 3rd dekad |
|---|--------------------------------|----------------|---|---|--------------------------------|----------------|---|
| Bałtycka / Baltic | -0,27 | -0,537 | -0,543 | Bałtycka / Baltic | -0,172 | -0,093 | -0,058 |
| Mazursko-Podlaska / Masurian-Podlasie | -0,463 | -0,709 | -0,619 | Mazursko-Podlaska / Masurian-Podlasie | -0,198 | -0,161 | -0,111 |
| Wielkopolsko-Pomorska / Greater Poland - Pomerania | -0,196 | -0,352 | -0,376 | Wielkopolsko-Pomorska / Greater Poland - Pomerania | -0,019 | -0,119 | -0,456 |
| Mazowiecko-Podlaska / Mazovia-Podlasie | -0,076 | -0,296 | -0,366 | Mazowiecko-Podlaska / Mazovia-Podlasie | -0,211 | -0,163 | -0,224 |
| Śląska / Silesian | -0,235 | -0,287 | -0,091 | Śląska / Silesian | -0,528 | -0,518 | -0,45 |
| Małopolska / Lesser Poland | -0,14 | -0,394 | -0,43 | Małopolska / Lesser Poland | -0,066 | 0,114 | -0,008 |
| Sudecka / Sudeten | -0,068 | -0,376 | -0,448 | Sudecka / Sudeten | -0,087 | -0,1 | -0,248 |
| Karpacka / Carpathian | -0,498 | -0,761 | -0,501 | Karpacka / Carpathian | -0,02 | 0,209 | 0,048 |

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

W tabeli 5 zaprezentowano wyniki korelacji między końcem okresu wegetacyjnego a wspomnianymi wcześniej warunkami meteorologicznymi, uwzględnionymi w okresie sierpień-październik, w październiku i trzeciej dekadzie października. Odnotowano tylko jedną umiarkowaną zależność, na poziomie 0,401, dla Krainy Mazursko-Podlaskiej zestawiając sumy opadów atmosferycznych w okresie sierpień-październik. W pozostałych przypadkach zaobserwowano brak związku liniowego lub jego słabą zależność.

Wyniki korelacji, prezentowane w tabelach 4 i 5 wykazały, że wciąż niezbędne jest uwzględnienie dodatkowych danych, w tym zarówno teledetekcyjnych, z systemów informacji przestrzennej, jak i klimatycznych, na podstawie których można opracować model do wyznaczania początku

i końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce. Rozwiązaniem może być też przygotowanie takich modeli dla opracowań wielkoskalowych, np. pojedynczych puszczy czy dużych kompleksów leśnych w wybranych krainach, z wykorzystaniem średniorozdzielczych zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 i Landsat. Zobrażenia Sentinel-2 są co pięć dni nad tym samym obszarem, z kolei satelita Landsat 8 przelatuje co 16 dni, co pozwala na śledzenie chwilowej fazy rozwoju, w wybranym etapie okresu wegetacyjnego. Natomiast niskorozdzielcze przestrzennie i codzienne zdjęcia satelitarne pozwalają na ciągłe śledzenie. Stanowią wartościowy zbiór danych, mogących wesprzeć program monitorowania stanu i rozwoju drzewostanów, a tym samym wyznaczenia okresu wegetacyjnego lasów.

Badania potwierdzają związek startu okresu wegetacyjnego lasów z warunkami meteorologicznymi zaobserwowanymi w okresie spoczynku (styczeń-marzec). Naukowcy zajmujący się obserwacjami fenologicznymi lasów na bazie rejestracji satelitarnych również wykazali relację wegetacji lasów z temperaturą powietrza, sumami opadów atmosferycznych (tabela 1). Niemniej z uwagi na zróżnicowanie gatunkowe drzewostanów na badanych obszarach oraz położenie geograficzne lasów odmiennych strefach klimatycznych, nie można jednoznacznie stwierdzić, czy proponowane w niniejszym artykule schematy przetwarzania danych satelitarnych sensora Vegetation oraz wyznaczenia na ich podstawie okresu wegetacyjnego wykazują lepsze wyniki. W przyszłości wskazane jest rozwinięcie automatycznej metodyki wyznaczenia parametrów charakteryzujących wegetację lasów strefy klimatu umiarkowanego w celu minimalizacji błędów, związanych z ustalaniem kryterium progowego początku i końca okresu wegetacyjnego.

Tabela 2. Korelacje między końcem okresu wegetacyjnego a maksymalną temperaturą powietrza oraz opadami w latach 1999-2016. Siła korelacji: $0,0 \leq r \leq 0,2$ – brak związku liniowego, $0,2 < r \leq 0,4$ – słaba zależność, $0,4 < r \leq 0,7$ – umiarkowana zależność, $0,7 < r \leq 0,9$ – silna zależność, $0,9 < r \leq 1,0$ – bardzo silna zależność

Table 2. Correlation between the end of the season and maximum air temperature and rainfall in 1999-2016. Size of correlation: $0,0 \leq r \leq 0,2$ – no correlation, $0,2 < r \leq 0,4$ – low correlation, $0,4 < r \leq 0,7$ – medium correlation, $0,7 < r \leq 0,9$ – high correlation, $0,9 < r \leq 1,0$ – very high correlation

| r(Koniec okresu weget., max. temp. pow./ r(end of season, max.. air temp.)) | Sierpień-październik / august-october | Październik / october | Październik trzecia dekada / october 3rd dekad | r(Koniec okresu weget., opady)/ r(end of season, rainfall) | Sierpień-październik / august-october | Październik / october | Październik trzecia dekada / october 3rd dekad |
|---|---------------------------------------|-----------------------|--|--|---------------------------------------|-----------------------|--|
| Baltycka / Baltic | 0,065 | 0,248 | 0,021 | Baltycka / Baltic | 0,299 | 0,151 | 0,009 |
| Mazursko-Podlaska / Masurian-Podlasie | -0,048 | 0,18 | 0,152 | Mazursko-Podlaska / Masurian-Podlasie | 0,401 | 0,031 | -0,101 |
| Wielkopolsko-Pomorska / Greater Poland - Pomerania | 0,193 | 0,29 | 0,174 | Wielkopolsko-Pomorska / Greater Poland - Pomerania | 0,043 | -0,058 | -0,027 |
| Mazowiecko-Podlaska / Mazovia-Podlasie | -0,22 | -0,098 | 0,059 | Mazowiecko-Podlaska / Mazovia-Podlasie | 0,288 | 0,157 | 0,033 |
| Śląska / Silesian | -0,022 | -0,062 | 0,011 | Śląska / Silesian | -0,019 | 0,124 | 0,074 |
| Małopolska / Lesser Poland | 0,233 | 0,216 | 0,169 | Małopolska / Lesser Poland | 0,03 | 0,048 | -0,1 |
| Sudecka / Sudeten | 0,102 | -0,02 | -0,109 | Sudecka / Sudeten | -0,213 | 0,127 | 0,103 |
| Karpacka / Carpathian | 0,3 | 0,362 | 0,125 | Karpacka / Carpathian | -0,327 | -0,206 | -0,132 |

Zródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

WNIOSKI

1. Na podstawie szeregów czasowych wskaźnika wegetacji NDVI, obliczonego z danych satelitarnych SPOT Vegetation i Proba-V jest możliwe wyznaczanie początku i końca okresu wegetacji lasów liściastych w Polsce.
2. Zaobserwowano znaczne opóźnienie wzrostu i rozwoju lasów liściastych wynoszące 20-30 dni w latach 2006 i 2013. Wyniki otrzymanych ustaleń są zbieżne z wynikami badań prowadzonych w Polsce. Otrzymane rezultaty zrealizowanych badań wskazują na istnienie niesprzyjających warunków atmosferycznych w okresie poprzedzającym wegetację lasów.
3. Test statystyczny Manna-Kendalla potwierdził brak trendu w wyznaczonych metodami teledetekcyjnymi parametrami startu i końca okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce w latach 1999-2016. Co oznacza, że w badanym okresie zmieniające się warunki atmosferyczne determinowały nieregularne terminy początku i końca okresu wegetacyjnego. Niemniej do kompleksowej analizy trendu wskazane jest rozszerzenie badanego okresu, uwzględniając na przykład czterdzieści lat obrazowania z serii satelitów meteorologicznych NOAA.

4. W latach 1999-2016 kierunek zmian maksymalnych wartości wskaźnika wegetacji NDVI w lasach liściastych wskazuje wyraźny trend rosnący, od dla lasów Krainy Mazursko-Podlaskiej do dla lasów Krainy Karpackiej.
5. Odnotowano istotnie statystycznie korelacje, na poziomie $-0,709$ i $-0,761$, między warunkami termicznymi a startem okresu wegetacyjnego dla Krainy Mazursko-Podlaskiej i Karpackiej w latach 1999-2016. Ujemne korelacje wykazały, że im wyższa była temperatura w marcu, tym odnotowano wcześniej początek okresu wegetacyjnego lasów względem pozostałych terminów startu okresu.
6. Dla lasów Krainy Śląskiej zaobserwowano silniejszą zależność sum opadów atmosferycznych na start okresu wegetacji niż w przypadku warunków termicznych.
7. Odnotowano brak korelacji lub słabą zależność między warunkami meteorologicznymi a końcem okresu wegetacyjnego, za wyjątkiem lasów Krainy Mazursko-Podlaskiej z umiarkowaną siłą relacji na poziomie $r=0,401$.
8. Przedstawiona w niniejszej pracy metodyka wyznaczania początku i okresu jest znana od co najmniej piętnastu lat, niemniej wydaje się nieodzowne w przyszłości dopracowanie jej dla obszarów leśnych w Polsce. Wskazane jest wprowadzenie automatycznych algorytmów, pozwalających na szczegółowe badania nad fazami rozwoju drzewostanów i parametrami definiującymi okres wegetacyjny lasów.

Konflikt interesów

Autor deklaruje brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania

Badania zostały wykonane w ramach Studiów Doktoranckich na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Autor składa serdeczne podziękowania pracownikom Centrum Teledetekcji Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie za cenne rady merytoryczne podczas pisania pracy. Autor serdecznie dziękuje również anonimowym Recenzentom za wsparcie merytoryczne, krytyczne uwagi i cenne wskazówki.

Literatura

- Backström H., Welander E., 1953, An investigation into the diffuse reflection capacity of leaves and needles of different species, *Norrl. Skogs. Förb. Tidskr.*, 1, 141-169.
- Bartold M., 2016, Opracowanie maski obszarów leśnych w celu monitoringu kondycji zdrowotnej lasów w Polsce na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych, *Leśne Prace Badawcze*, 77(2), 141-150, doi:10.1515/irp-2016-0016.
- Bartold M., 2012, Monitoring of forest damages in Poland and Slovakia based on Terra.MODIS satellite images, *Geoinformation Issues*, 4(1), 23-31.
- BIOSTRATEG RemBioFor, <http://rembiofor.pl/> [25.09.2016].
- Beck P.S.A., Atzberger C., Høgda K.A., Johansen B., Skidmore A.K., 2006, Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI, *Remote Sensing of Environment*, 100, 321-334, doi:10.1016/j.rse.2005.10.021.
- Bochenek Z., Ziolkowski D., Bartold M., 2015, Application of NOAA AVHRR satellite images for studying various environmental and climatic conditions in Polish forests, *Geoinformation Issues*, 7(1), 29-37.

- Bochenek Z., 1999, Operacyjne wykorzystanie zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR do oceny warunków rozwoju upraw w Polsce, *Fotointerpretacja w geografii*, 29, 3-13.
- Ciołkosz A., Miszański J., Olędzki J.R., 1999, *Interpretacja zdjęć lotniczych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, ISBN 978-83-01-12880-7.
- Ciołkosz A., Bielecka E., 2005, Pokrycie terenu w Polsce – Baza danych CORINE Land Cover, *Biblioteka Monitoringu Środowiska*, Inspektorat Ochrony Środowiska, 1-76.
- CORINE Land Cover nomenclature illustrated guide, <http://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/Nomenclature.pdf> [25.09.2016].
- Dierckx W., 2015, Validation of spectra continuity between PROBA-V and SPOT-VEGETATION global daily datasets, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3, 1155-1162. doi:10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1155-2015.
- Dodson R., Marks R., 1997, Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region, *Climate Research*, 8, 1-20.
- Gupta U., 2014, Study of temporal variation of vegetation indices and phenology of tropical deciduous broad-leaf forest in eastern India, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-8, 569-572. doi:10.5194/isprsarchives-XL-8-569-2014.
- Han Q., Luo G., Li C., 2013, Remote sensing-based quantification of spatial variation in canopy phenology of four dominant tree species in Europe, *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1), 073485, doi:10.1117/1.JRS.7.073485.
- Hufnagel L., Garamvölgyi A., 2014, Impacts of climate change on vegetation distribution No. 2 – climate change induced vegetation shifts in the new world, *Applied Ecology and Environmental Research*, 12(2), 355-422, doi:10.15666/aer/1202_355422.
- Hościło A., Tomaszewska M., 2015, CORINE Land Cover 2012-4th CLC inventory completed in Poland, *Geoinformation Issues*, 6(1), 49-58.
- Jönsson A.M., Eklundh L., Hellström M., Barring L., Jönsson P., 2010, Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology, *Remote Sensing of Environment*, 114, 2719-2730, doi:10.1016/j.rse.2010.06.005.
- Jönsson P., Eklundh L., 2002, Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 1824-1832, doi:10.1109/TGRS.2002.802519.
- Jönsson P., Eklundh L., 2004, TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data, *Computers & Geosciences*, 30, 833-845, doi:10.1016/j.cageo.2004.05.006.
- Karlsen S. R., Elvebakk A., Hogda K. A., Grydeland T., 2014, Spatial and Temporal Variability in the Onset of the Growing Season on Svalbard, Arctic Norway – Measured by MODIS-NDVI Satellite Data, *Remote Sensing*, 6, 8088-8106, doi:10.3390/rs6098088.
- Kluza M., Zientarska A., 1999, Obserwacje fenologiczne wybranych gatunków drzew i krzewów z rodziny Celastraceae i Rosaceae introdukowanych w ogrodzie dendrologicznym Akademii Rolniczej w Poznaniu, *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*, CCCIX, 31-54.
- LIFE+ ForBioSensing, <http://www.forbiosensing.pl/start> [25.09.2016].
- Mager P., Kępińska-Kasprzak M., 2016, Pojawy fenologiczne w 2014 roku w Trzebawiu koło Poznania na tle wcześniejszych obserwacji fitofenologicznych na obszarze środkowej Wielkopolski, *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, 15(2), 93-103, doi:10.15576/ASP.FC/2016.15.2.93.
- Mager P., Kępińska-Kasprzak M., 2015, Obserwacje fenologiczne prowadzone w ramach projektu PLGRID Plus, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 67, 99-108.
- Meroni M., Fasbender D., Balaghi R., Dali M., Haffani M., Haythem I., Hooker J., Lahlou M., Lopez-Lozano R., Mahyou H., Moussa M.B., Sghaier N., Waga T., Leo O., 2016, Evaluating NDVI Data Continuity Between SPOT-VEGETATION and PROBA-V Missions for Operational Yield Forecasting in North African Countries, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(2), 795-804, doi:10.1109/TGRS.2015.2466438.
- Molga M., 1970, *Meteorologia rolnicza*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.

- Musiał J., 2009, Metodyka oceny stanu środowiska przyrodniczego obszarów prawnie chronionych w Polsce w oparciu o zintegrowane dane teledetekcyjne i klimatyczne, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 20, 307-320.
- O'Connor B., Dwyer E., Cawkwell F., Eklundh L., 2012, Spatio-temporal patterns in vegetation start of season across the Island of Ireland using the MERIS Global Vegetation Index, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 79-94, doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.01.004.
- Prabakaran C., Singh C. P., Panigrahy S., Parihar J. S., 2013, Retrieval of forest phenological parameters from remote sensing-based NDVI time-series data, *Current Science*, 105 (6), 795-802.
- Senf C., Pflugmacher D., van der Linden S., Hostert P., 2013, Mapping Rubber Plantations and Natural Forests in Xishuangbanna (Southwest China) Using Multi-Spectral Phenological Metrics from MODIS Time Series, *Remote Sensing*, 5, 2795-2812, doi:10.3390/rs5062795.
- Siłuch M., Bartoszek K., 2012, Możliwości wykorzystania danych satelitarnych do wyznaczania początku i końca okresu wegetacyjnego, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 12(2), 245-255.
- State of Europe's Forests 2015, <http://www.foresteuropa.org/fullsoef2015> [25.09.2016].
- Tan B., Morisette T., Wolfe R.E., Gao F., Ederer G.A., Nightingale J., Pedelty J.A., 2011, An Enhanced TIME-SAT Algorithm for Estimating Vegetation Phenology Metrics From MODIS Data, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(2), 361-371, doi:10.1109/JSTARS.2010.2075916.
- Tuanmu M.N., Viña A., Bearer S., Xu W., Ouyang Z., Zhang H., Liu J., 2010, Mapping understory vegetation using phenological characteristics derived from remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, 114, 1833-1844, doi:10.1016/j.rse.2010.03.008.
- Tucker C.J., 1979, Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150, doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Turlej K., Bojanowski J., Bartold M., 2013, Maska obszarów rolniczych dostosowana do monitoringu wzrostu roślin uprawnych w Polsce przy użyciu szeregów czasowych NOAA-AVHRR, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 25, 233-242.
- Vrieling A., Meroni M., Mude A.G., Chantarat S., Ummenhofer C.C., de Bie K., 2016, Early assessment of seasonal forage availability for mitigating the impact of drought on East African pastoralists, *Remote Sensing of Environment*, 174, 44-55, doi:10.1016/j.rse.2015.12.003.
- Wawrzoniak J., 2014, *Stan uszkodzenia lasów w Polsce w 2013 roku na podstawie badań monitoringowych*, Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary.
- Yu X., Wang Qiankun, Yan H., Wang Y., Wen K., Zhuang D., Wang Q., 2014, Forest Phenology Dynamics and its Responses to Meteorological Variations in Northeast China, *Advances in Meteorology*, 2014, 1-12, doi:10.1155/2014/592106.
- Zielony R., Kliczkowska A., 2012, *Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010*, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, ISBN 978-83-61633-62-4.

Summary

The work presented here aims at investigation of phenological changes using satellite-based vegetation indices in broad-leaved forests over Poland. This study used time-series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) comprising SPOT Vegetation and Proba-V images from 1999 to 2014. The phenological parameters such as onset of the growing season, end of the season, and maximum NDVI observed during the growing season were determined using TIMESAT program.

Within the framework of the study a series of maps presenting the onset and the end of the growing season in broad-leaved forests in natural-forest regions were elaborated. Maximum NDVI observed during the growing season for years 1999 - 2016 in broad-leaved forests was investigated as well.

Spatial and temporal variability analysis revealed that in 2006 and 2013 the onset of the growing season within eight Natural-Forest Regions (NFRs) was delayed at the rate of 20-30 days. Delays of the onset implied shorter growing season at 180 days over deciduous forests of Mazovia-Podlasie and Silesian NFRs in 2013. In order to detect a trend in a series of phenological parameters the Mann-Kendall test was applied at 5% significance level. The test revealed statistically significant upward trend of maximum NDVI 1999-2014 in each of eight NFRs with highest Kendall's tau in Carpathian ($\tau=0,802$), Masurian-Podlasie ($\tau=0,711$) and Mazovia-Podlasie ($\tau=0,700$). It was found that the onset of the growing season determined with the remote sensing method was strongly correlated with maximum air temperature in March over Masurian-Podlasie and Carpathian, at $r=-0,709$ and $r=-0,761$ respectively.

The paper indicates that more studies on forest phenology metrics and its relations to meteorological observations in Poland will help to understand the responses of temperate forest phenology to climate changes.